

考虑结构-设备相互作用的变电站 主厂房系统动力特性研究

文 波¹, 徐浩轩¹, 侯聪霞², 牛荻涛¹

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 陕西 西安 710055;

2. 石家庄职业技术学院建工系, 河北 石家庄 050081)

摘 要:变电站主厂房是一种特殊的工业建筑, 由于其中的电气设备形式复杂, 质量较大, 摆放形式多样, 因此主厂房与设备之间存在着非常复杂的动力相互作用. 对我国通用的户内式变电站主厂房进行较全面的动力特性研究, 建立了考虑设备-结构相互作用的变电站主厂房有限元计算模型以及电气设备计算模型, 通过详细的模态分析, 找出了主厂房结构及电气设备的动力特性, 以及考虑二者相互作用后变电站系统的动力特性变化, 其结果可以为同类变电站进行地震反应分析提供依据.

关键词:变电站主厂房结构; 电气设备; 相互作用; 模态分析

中图分类号: TU352.1; TU375.4

文献标志码: A

文章编号: 1006-7930(2012)05-0620-07

变电站作为电力系统的重要组成部分, 它是改变电压等级, 汇集配送电能的枢纽. 由于户内式变电站占地面积小, 功能齐全, 便于运营管理, 并且全部电气设备集中布置于主厂房, 所以越来越多的城市变电站采用户内型式. 户内式变电站最重要的电气设备是六氟化硫(SF₆)气体绝缘全封闭式组合配电装置 Gas-Insulator-Switchgear(以下简称 GIS), 它是整个变电站的核心部分. 由于 GIS 结构体系复杂, 质量较大, 设备摆放形式多样, 在各种荷载作用下, 电气设备与主厂房结构之间往往处于弯扭耦合的复合受力状态中, 因此电气设备对主厂房结构的动力影响不容忽视^[1-3].

目前在变电站主厂房结构设计中, 电气设备通常作为等效荷载考虑, 未考虑其对整体结构动力特性的影响, 忽略了主体结构与电气设备整体协调变形. 根据已有研究表明^[4-6], 电气设备的质量分布和刚度分布比较复杂, 它对变电站主厂房结构动力特性的影响不能被忽视, 因此有必要考虑设备与结构之间的相互作用并建立真实合理的动力分析模型. 本文以《国家电网公司输变电工程典型设计》^[7-8]中的 8 种变电站主厂房方案为主要研究对象, 分别建立变电站主厂房结构有限元计算模型、GIS 电气设备有限元计算模型及设备与结构组成的复合结构体系计算模型, 进行变电站的动力特性分析, 找出主厂房结构与电气设备的相互影响规律.

1 模态分析方法

地震作用下变电站中 GIS 电气设备、厂房结构及设备-结构组成的复合结构体系, 可由下述动力平衡方程表示:

$$M\{\ddot{u}\} + C\{\dot{u}\} + K\{u\} = \{F(t)\} \quad (1)$$

式中, M 为复合体系的质量矩阵, 可表示为:

收稿日期: 2012-04-10 修改稿日期: 2012-10-08

基金项目: 国家自然科学基金项目(51008246); 陕西省教育厅科学基金项目(2010JK632); 教育部长江学者和创新团队发展计划资助

作者简介: 文 波 (1975-), 女, 博士, 副教授, 国家一级注册结构工程师, 主要从事结构耐久性及抗震方面的研究.

$$M = \begin{bmatrix} M_s & & \\ & M_c & \\ & & M_j \end{bmatrix}$$

式中: M_s 为 GIS 电气设备质量; M_c 为连接单元质量; M_j 为主厂房结构质量.

$[C]$ 为复合体系的阻尼矩阵,可表示为:

$$C = \begin{bmatrix} C_s & C_{se} \\ C_{es} & C_e \end{bmatrix}$$

式中: C_s 为主体结构阻尼矩阵; C_e 为电气设备阻尼矩阵.

K 为复合体系的刚度矩阵,可表示为:

$$K = \begin{bmatrix} K_{ss} & K_{sc} & K_{sj} \\ K_{cs} & K_{cc} & K_{cj} \\ K_{js} & K_{jc} & K_{jj} \end{bmatrix}$$

式中: K_{ss} 、 K_{cc} 、 K_{jj} 分别代表电气设备刚度、连接单元刚度和主厂房结构刚度; $\{ \ddot{u} \}$ 、 $\{ \dot{u} \}$ 、 $\{ u \}$ 分别表示复合结构体系的加速度、速度和位移反应向量; $\{ F(t) \}$ 为动力荷载向量.

为了解耦式(1) 的动力平衡方程,需要计算方程的特征向量与特征值,即

$$[K - \omega_i^2 M]v_i = 0 \tag{2}$$

式中: ω_i 为圆频率; v_i 是与自振频率相对应的特征向量.因此,利用式(2) 即可得到结构的自振频率 ω 及对应的振型向量.

2 计算模型

2.1 分析单元的选取

模态分析采用美国 CSI 公司开发的大型通用有限元分析与设计软件 SAP2000 V14. 1. 0^[9],对变电站主厂房系统各部分构件选择相应的有限元分析单元,见表 1.

GIS 电气设备中的各弹簧操纵机构按均布线荷载垂直施加在壳单元内壁,主体结构中各气室 SF₆ 气体按表面压力施加于壳单元内部;电气设备与结构通过预埋于楼层中的槽钢连接,其连接方式按照固定连接考虑.

表 1 有限元计算单元
Tab. 1 Finite calculation element

变电站主厂房系统	构件名称	SAP2000 中对应的单元类型
结构部分	梁、柱	框架单元
	现浇楼板、屋面板、钢筋混凝土墙	壳单元
电气设备 GIS 部分	GIS 主体部分	壳单元(铝合金)
	GIS 附属开关柜	实体单元(铝合金)
	GIS 设备底部支架	框架单元(Q235 钢)
连接单元部分	槽钢	框架单元(Q235 钢)

2.2 计算模型的建立

本文主要对《国家电网公司输变电工程典型设计》中给出的变电站进行归类分析,发现变电站主厂房通常采用现浇钢筋混凝土框架结构型式,层数为地面以上二层或三层,带一层地下室,地下室外围护墙为钢筋混凝土墙.结构安全等级为二级,结构重要性系数为 1. 0,混凝土强度等级 C30,钢筋等级为 HPB235、HRB335 级,填充墙采用空心砖或砌块.根据电压等级和使用功能的不同,可以分为 8 类,为便于表述,对这 8 种主要类型变电站进行编号,分别为 B-1、B-2、B-3、B-4、B-5、B-6、B-7、B-8,其中 B-1~B-3 为 110 kV 等级变电站,B-4~B-8 为 220kV 等级变电站.此外,为了对变电站动力特性进行对比分析,将不考虑设备-结构相互作用的计算模型(电气设备按等效荷载处理)称为 M1,将考虑设备-结构相互作用的模型称为 M2,各类变电站有限元计算模型如图 1 所示.

电气设备选用西安高压开关厂生产的 GIS 组合电气设备,分为电缆进出线设备和套管进出线设备两种.电缆进出线设备尺寸为:进深×宽度×高度=7. 2 m×1. 5 m×4. 9 m,质量 9. 0 t;套管进出线设

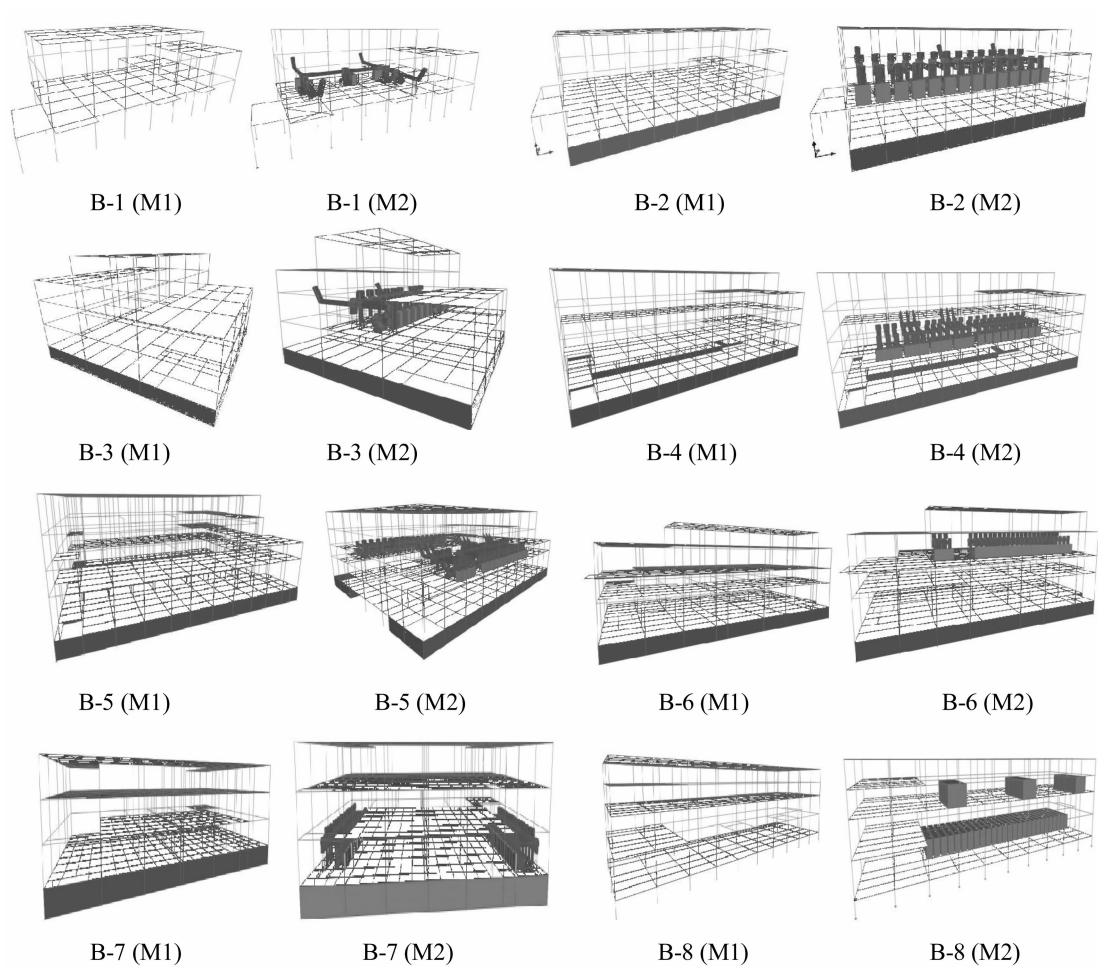
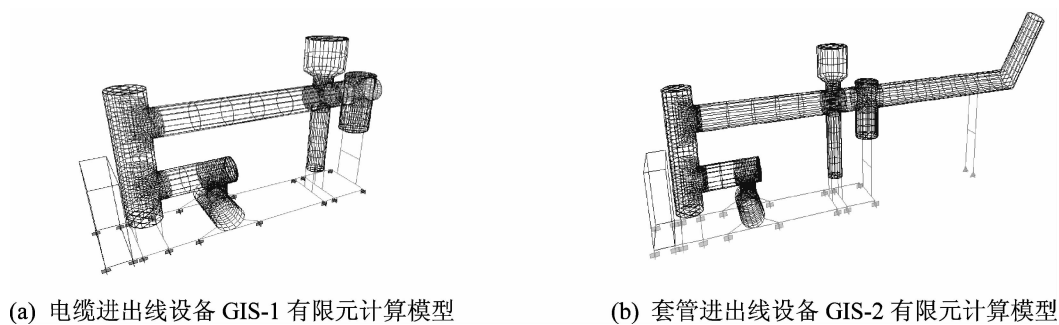


图1 各类变电站主厂房有限元计算模型示意图

fig. 1 Finite unit calculation of power transformation station

备尺寸为:进深 \times 宽度 \times 高度 $=15\text{ m}\times1.5\text{ m}\times5.6\text{ m}$,质量 11.0 t . GIS壳体为铝合金材质,壁厚 20 mm ; SF_6 气体工作压力为 0.6 MPa . 电气设备计算模型见图2所示,其中电缆进出线设备间隔简称为GIS-1,套管进出线间隔简称为GIS-2.



(a) 电缆进出线设备 GIS-1 有限元计算模型

(b) 套管进出线设备 GIS-2 有限元计算模型

图2 电气设备计算模型

Fig. 2 Calculation model of electric equipment

3 模态分析结果

3.1 变电站主厂房模态分析结果

各类变电站考虑设备-结构相互作用及不考虑相互作用的动力特性对比见图3所示,鉴于篇幅限制,本文仅给出其中两类变电站的前8阶模态分析结果及振型描述,分别见表2及表3所示.

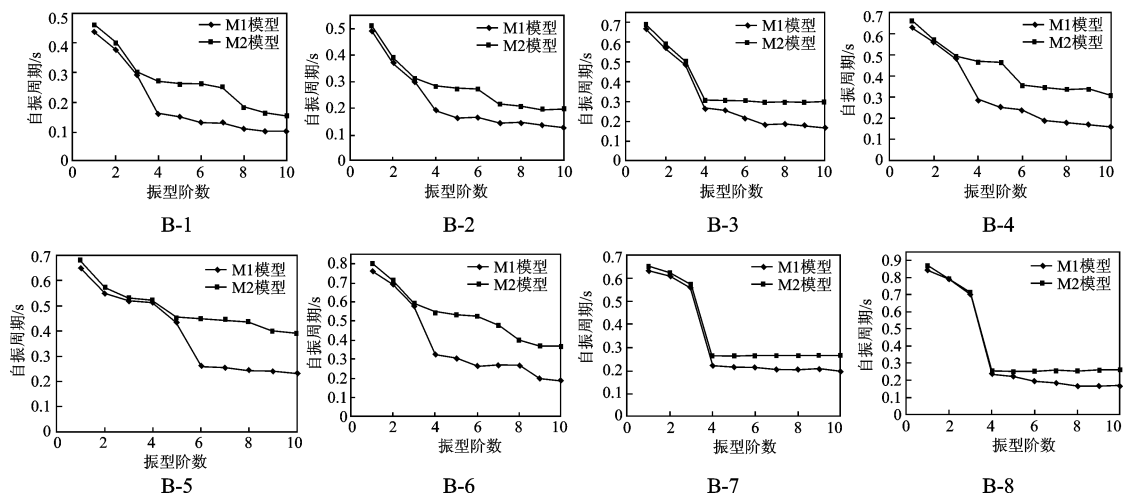


图 3 变电站主厂房前 8 阶自振周期对比图

Fig. 3 The first 8 natural vibration period

表 2 B-1(110 kV 等级)变电站模态分析结果

Tab. 2 Model analysis of 110 kV substation

振型	M1 模型			M2 模型		
	自振周期 /s	自振频率 /Hz	振型描述	自振周期 /s	自振频率 /Hz	振型描述
1	0.44	2.29	结构沿横向平动,并略带扭转	0.46	2.17	结构沿横向平动,并略带扭转
2	0.38	2.65	结构沿纵向平动	0.40	2.50	结构沿纵向平动
3	0.29	3.47	结构扭转	0.30	3.33	结构扭转,略带设备振动
4	0.16	6.06	结构沿横向平动	0.27	3.76	GIS 设备套管部分局部振动
5	0.15	6.54	结构沿纵向平动	0.26	3.83	GIS 设备套管部分局部振动
6	0.13	7.64	结构沿横向平动	0.26	3.90	GIS 设备套管部分局部振动
7	0.13	7.79	结构屋面竖向振动	0.25	4.00	GIS 设备套管部分局部振动
8	0.11	8.96	结构楼板部分竖向振动	0.18	5.52	GIS 设备局部振动

表 3 B-4(220 kV 等级)变电站模态分析结果

Tab. 3 Model analysis of 220 kV electric equipments

振型	M1 模型			M2 模型		
	自振周期 /s	自振频率 /Hz	振型描述	自振周期 /s	自振频率 /Hz	振型描述
1	0.63	1.58	结构扭转为主,带有横向平动	0.66	1.52	结构扭转为主,带有横向平动
2	0.56	1.78	结构纵向平动	0.57	1.83	结构纵向平动
3	0.48	2.07	结构横向平动	0.49	2.09	结构横向平动
4	0.28	3.52	结构横向平动及扭转振动	0.46	2.17	GIS 设备局部振动
5	0.25	4.00	结构纵向平动	0.46	2.19	GIS 设备局部振动
6	0.23	4.27	结构纵向平动并带有一定扭转	0.35	2.85	GIS 设备局部振动
7	0.18	5.61	结构纵向平动	0.34	2.93	GIS 设备局部振动
8	0.17	5.88	结构即横向平动又竖向振动	0.33	3.04	GIS 设备局部振动

通过以上各类变电站模型的动力特性计算结果可知,各模型前 3 阶结构均表现为横、纵向两个方向的平动及扭转,这主要是由于变电站主厂房结构屋面多为重型钢筋混凝土梁,建筑平面布置有很多大开间房屋,楼层层高较大,局部有错层,导致结构质量和刚度分布严重不均匀,因此结构会表现为较明显的扭转作用.在考虑相互作用的模型 M2 中,除 B-5 类型变电站外,其余七种模型在前 3 阶的振动特性大体与 M1 模型相似,而第四阶振型以后均表现为 GIS 设备的局部振动,自振周期值比 M1 模型均大了约 40%左右,并且 M1 模型从第 4 阶后自振周期值迅速下降,最大下降幅度为 70%,M2 模型的下降幅度

仅为 10%，即考虑结构-设备相互作用后的复合结构体系自振周期值衰减较慢，这主要是因为考虑结构-设备相互作用的计算模型真实计入了设备对整体结构的刚度贡献，在高阶振型中体现了更多以设备为主的振动特性。

通过模态分析还可以看出，B-1 类型变电站的第 1 阶自振周期为 0.44 s，这与第三类场地土特征周期值(为 0.45 s)非常接近，为了避免共振导致建筑物的破坏加剧，B-1 及 B-2 类型变电站不宜建造在该类场地土上；同样，B-3、B-5 及 B-7 的第一阶自振周期分别为 0.67 s、0.63 s、0.63 s，与第四类场地土特征周期值(0.65 s)非常接近，因此对于上述三种类型变电站不宜建造在该类场地土上。

3.2 电气设备 GIS 模态分析结果

电气设备模态分析结果见表 4 所示。

表 4 电气设备模态分析结果
Tab.4 Model analysis of electric equipments

模型名称	振型号	自振周期/s	自振频率/Hz	振型描述
GIS-1	1	0.152	6.579	设备整体沿横向平动为主,带有一定程度扭转
	2	0.147	6.803	设备整体沿纵向平动
	3	0.091	11.000	设备扭转
	4	0.087	11.494	设备沿纵向平动为主,并带有扭转
	5	0.074	13.514	设备部分构件的扭转
	6	0.061	16.393	设备部分构件扭转为主,略带纵向的平动
	7	0.053	18.868	设备部分构件扭转为主,并带横向的平动
	8	0.047	21.277	设备部分构件的扭转
GIS-2	1	0.312	3.166	设备套管沿横向的平动加振动
	2	0.185	5.405	设备整体沿纵向的平动
	3	0.150	6.667	设备整体沿横向平动,并带有一定程度的扭转
	4	0.097	10.309	设备部分构件以扭转为主,并带有沿横向的平动
	5	0.081	12.346	设备部分构件的扭转
	6	0.069	14.493	设备套管部分的竖向振动
	7	0.065	15.385	设备整体扭转为主,略带横向的平动
	8	0.060	16.667	设备部分构件的扭转

由表 5 可以看出,GIS-1 设备的第一阶振型为设备的横向平动伴有部分扭转,这主要是由于 GIS 设备内部构件布置不均匀,导致设备刚度及质量分布不均匀所致。GIS-2 设备的第 1 阶振型表现为套管部件的平动加振动,这是因为 GIS-2 模型的套管部分跨度较长,向上弯曲的高度较大,使设备柔性加大;相比 GIS-1 模型,GIS-2 刚度空间的分布更加不均匀,重心位置较高,同时套管部分的支撑比较薄弱,因此容易在套管的顶部及端部引起应力集中而发生破坏。

此外,通过对 GIS-1 及 GIS-2 的模态分析还可以看出,GIS-1 模型的一阶周期为 0.152 s,小于《建筑抗震设计规范》(GB50011—2010)^[10]中各类场地土的特征周期,因此电缆进出线设备不会与各类场地土发生共振;GIS-2 模型的一阶周期为 0.312 s,而 I₀第三组和 I₁第二组的场地土特征周期值为 0.30 s、II 类第一组场地土特征周期值为 0.35 s,都与其非常相近,因此,套管进出线设备不宜直接安装在此类场地土上。

3.3 电气设备不同摆放方式对结构的影响

由统计分析可知,上述八种变电站系统中,设备与结构的质量比大约在 10%~15%,根据文献[6],当质量比参数一定时,设备不同摆放方式对结构动力特性具有影响。本文对变电站电气设备不同摆放方式下对整体结构的动力影响亦进行了分析,结果见表 5。

表 5 变电站电气设备摆放楼层

Tab.5 Layer of electric equipments

变电站模型编号	设备所处楼层
B-7、B-8	一层
B-1、B-2、B-3、B-4、B-5	二层
B-6、B-8	三层

当设备位于第一层时,即 B-7,其 M5 与 M1 的第一阶周期比值为 1.03;当设备位于第二层时,即 B-1~B-5,其 M5 与 M1 的第一阶周期比值在 1.05 左右;当设备位于第三层时,即 B-6、B-8,其 M5 与 M1

的第一阶周期比值 1.07. 说明当电气设备位于第二、三层时,第一阶自振周期值增大幅度较大,对结构动力特性影响也较大. 这与文献[1]的结论相一致.

4 结 论

本文对我国变电站进行归类分析,将变电站主要分为 8 种类型,对每一种类型变电站建立考虑主体结构—电气设备相互作用的三维计算模型,进行动力特性分析,并将结果与不考虑结构-设备相互作用的变电站动力特性分析结果进行对比,得到以下结论.

(1)对八类变电站主厂房分别建立了不考虑主厂房结构—电气设备相互作用模型、考虑主厂房结构—电气设备相互作用模型,二者前三阶振型特征均表现为主厂房结构的平动、扭转,说明变电站主厂房结构在空间上刚度、质量分布严重不均,具有很明显的扭转效应. 从第四阶以后,二者动力特性发生了变化,考虑主厂房结构—电气设备相互作用模型表现出了设备为主的振动特性,而不考虑结构—设备相互作用的计算模型则无法体现.

(2)建立了电气设备的三维有限元模型,其中电气设备套管部分对振动最为敏感,在地震中易受到破坏,设计时应采取相应保护措施.

(3)当电气设备与主厂房结构的质量比在 10%~15%时,随着电气设备安放楼层的增高,电气设备对变电站主厂房结构动力特性影响更明显.

参考文献 References

- [1] SAVAGE William U, NISHENKO Stuart P, HONEGGER Douglas G, et al. Guideline for Assessing the Performance of Electric Power Systems in Natural Hazard and Human Threats Events[J]. Electrical Transmission Line (ASCE), 2006:39-46.
- [2] 刘志钦, 白国良, 李红星, 等. 火电厂主厂房型钢混凝土框排架结构动力特性实验研究[J]. 西安建筑科技大学学报:自然科学版, 2010, 42(4):538-544.
LIU Zhi-qin, BAI Guo-liang, LI Hong-xing, et al. Test study on dynamic characteristics of SRC frame-bent structure for main building of a thermal power plant [J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2010, 42(4):538-544.
- [3] HONG K J, Der KIUREGHIAN A. Interaction Effect on Cable-Connected Electrical Equipment [C] // 13th WCEE, Canada, 2004, 186.
- [4] IEEE Standard 693, IEEE Recommended Practice for Seismic Design of Substations [S]. Institute of Electrical and Electronic Engineers, 1997.
- [5] KIUREGHIAN A D, SACKMAN A L, HONG K J. Interaction in interconnected electrical substation equipment subjected to earthquake ground motions [R]. PEER 1999/01, 1999.
- [6] 文波. 配电楼-电气设备系统的地震反应及减震控制研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2008.
WEN Bo. Study on Earthquake Response Analysis and Seismic Control of Switch Building-Electrical Installations System [D]. Xi'an: Xi'an Univ. of Arch. & Tech., 2008.
- [7] 刘振亚. 国家电网工程输变电工程典型设计(110 kV 变电站分册)[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
LIU Zhen-ya. Typical Design of National Grid Power Transmission Project (110 kV substation Volume)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [8] 刘振亚. 国家电网工程输变电工程典型设计(220 kV 变电站分册)[M]. 北京:中国电力出版社, 2005.
LIU Zhen-ya. Typical Design of National Grid Power Transmission Project (220 kV substation Volume)[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2005.
- [9] 北京金土木软件技术有限公司. CSI 分析参考手册[M]. 北京:北京金土木软件技术有限公司, 2009.
The Beijing Jin Civil Software Technologies Ltd. CSI Analysis Reference Manual[M]. Beijing: The Beijingjin Civil Software Technologies Ltd, 2009.
- [10] GB50011—2010 建筑抗震设计规范[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2010.
GB50011—2010 Code for seismic design of buildings [S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2010.

Analysis on the dynamic characteristics of equipment-structure interaction for the main building of a transformer substation

WEN Bo¹, XU Hao-xuan¹, HOU Cong-xia², NIU Di-tao¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. Shijiazhuang vocational technology institute, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: Substation is a special kind of industrial architecture, because electric equipments in the main structure have so many characteristics such as complex form, large weight and various sitting styles etc. There is a very complicated dynamic interaction between the electrical equipments and the main structure. In this paper, the types of substations are classified. Both the 3-D calculation models involving interaction of structure-electrical equipments and the model of electrical equipments themselves are established. The traditional structure models without interaction of structure-electrical equipments are also set up for comparison. The dynamic characteristics of main structure, electrical equipments and their interaction are received by modal analysis. The results can provide some valuable reference in seismic design and earthquake response analysis of the similar substations.

Key words: *main structure; electrical equipments; interaction; modal analysis*

Biography: WEN Bo, Ph. D., Associate Professor, Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13991361286, E-mail: wenbo_mail@163.com

(上接第 613 页)

[10] 吕志涛, 孟少平. 现代预应力混凝土设计[M]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998.

LÜ Zhi-tao, MENG Shao-ping. Design of Modern Prestressed Concrete[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 1998.

[11] 李瑞鸽, 杨国立, 张耀庭. 预应力混凝土梁模态分析的有限元软件实现[J]. 西安建筑科技大学学报: 自然科学版, 2012, 44(2): 188-192.

LI Rui-ge, YANG Guo-li, ZHANG Yao-ting. Modal analysis of prestressed concrete beam with finite element software[J]. J. Xi'an Univ. of Arch. & Tech.: Natural Science Edition, 2012, 44(2): 188-192.

Analysis and monitoring of the influence of the column's force on the prestressed frame beam tensioning

HU Chang-ming^{1,2}, FU Liao-yuan¹, GUO Yan¹

(1. School of Civil Engineering, Xi'an Univ. of Arch. & Tech., Xi'an 710055, China;

2. State Key Laboratory of Architecture Science and Technology in West China(XAUAT), Xi'an 710055, China)

Abstract: In order to explore the force of the frame column in the process of prestressed frame beam tensioning based on the former research of secondary interior force of the frame column and through the calculation and monitoring of the column of a prestressed frame structure, the changing regularity of secondary interior force of the frame column in the process of the prestressed frame beam tensioning is analyzed. The results indicate that the third moment generated by axial deformation of beam is larger. So the third moment shall not be ignored in design. By comparison of monitoring data with results of numerical simulation, the inner side of the top of columns and the outside of the bottom of columns are in tension. Meanwhile the outside of the top of columns and the inner side of the bottom of columns are in compression. There is a linear relation between stress and tension loading. Research results can be used as reference for design and construction of similar projects. It will provide reliable data for the establishment of relevant standards.

Key words: *prestressed concrete; frame structure; third moment; numerical analysis; on-site monitoring*

Biography: HU Chang-ming, Professor, Ph. D., Xi'an 710055, P. R. China, Tel: 0086-13609161448, E-mail: hu_tm@163.com